对冲火焰中煤粉着火的实验研究

吴宁[1,2]　宗毅晨[1]　李水清[1]　姚强[1]　罗忠敬[2]

（1. 清华大学热能工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室，北京 100084，
2. 清华大学燃烧能源中心，北京 100084）

摘　要　本文发展并建立了一套适用于研究煤粉穿越气相火焰面着火特性的对冲火焰实验系统，基于碰撞解聚原理研制了全新的微小载气量给粉系统。通过统计 ICCD 拍摄的煤粉着火图像，结合数值计算分析煤粉颗粒的沿程温度经历，发现穿越扩散火焰面时颗粒升温速率可达 10^5 K/s，火焰面温度及煤粉停留时间是决定煤粉穿越火焰面后着火模式的主要因素。

关键词　对冲火焰；煤粉；着火；给粉

中图分类号：　TK123　　　　**文献标识码：** A

Experimental Investigation of Coal Ignition in Counterflow Flames

WU Ning[1,2]　ZONG Yi-Chen[1]　LI Shui-Qing[1]　YAO Qiang[1]　C K Law[2]

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Center for Combustion Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract　A novel counterflow flame apparatus that can meet the requirement of heterogeneous combustion of pulverized coal particles was developed. A new micro-scale powder feeding system was developed based on the fundamental of deagglomeration by particle-wall impaction, achieving a perfect dispersion and stable feeding rate of coal particles in low carrier flows. With the advanced ICCD optical technology, the behavior of coal particles across the counterflow flame was observed. Results show that the particle heat rate can reach as high as 10^5 K/s, while flame temperature and particle residence time are the dominant factors that influence the ignition mechanism in the post-flame zone.

Key words：conterflow flame; pulverized coal; ignition; particle feeder

0　引言

煤粉热解释放的挥发分在颗粒周围的均相着火及燃烧是煤粉燃烧初期最重要和具有决定性意义的物理化学过程[1, 2]。颗粒周围空间发生的气相反应对颗粒温度、表面反应速率及反应产物等都有着重要影响，并进而改变了其后煤焦的燃烧、破碎、及细颗粒形成及污染物排放特性，因此是研究煤燃烧过程的最重要步骤之一[3, 4]。当前研究煤粉着火特性的常用方法，包括滴管炉法（DTF）、热重分析法（TGA）、线网反应器法、激光加热反应器法等。这些方法均将煤粉颗粒置于均相气氛环境中，然而在实际燃煤系统中，煤粉受热升温的过程往往经历着复杂的流场条件，会出现穿越火焰面的情况，从而改变其着火特性。近期有学者在生物质和煤混烧实验研究中也发现类似的现象：具有较高轴向动量和加热时间的大颗粒，会穿越挥发分火焰区并运动到下游富氧环境中。由于挥发分的释放被延后，使得挥发分火焰更短，从而使颗粒在完全释放挥发分前的穿越距离增大[5]。因此，研究煤粉在穿越火焰面过程中的着火特性具有现实意义。受限于实验方法和观测条件，目前尚未见到针对这一问题的详细报道。为此本文发展并建立了一套适用于研究煤粉着火特性的加压对冲火焰实验系统，利用先进的ICCD 光学测量方法观测和表征煤粉的着火过程，研究煤粉颗粒穿越火焰面的行为特性。

1　实验系统与方法

着眼于观测和研究煤粉穿越火焰面的物理化学过程，本文采用上下对冲反应流的方式构建气流滞止面和扩散火焰面。由于对冲扩散火焰仅在流场对称中心轴线上具有一维特性，为使煤粉穿越火焰面

基金项目：国家 973 项目“化石燃料燃烧排放 PM2.5 源头控制技术的基础研究”（2013CB228500）
作者简介：吴宁（1982-），男，博士，主要从事燃烧及污染物排放研究。通信作者：姚强，教授，yaoq@tsinghua.edu.cn

符合理论条件，将煤粉颗粒以近似点源方式伴随燃料气体沿中心对称轴引入反应区域，见图1。

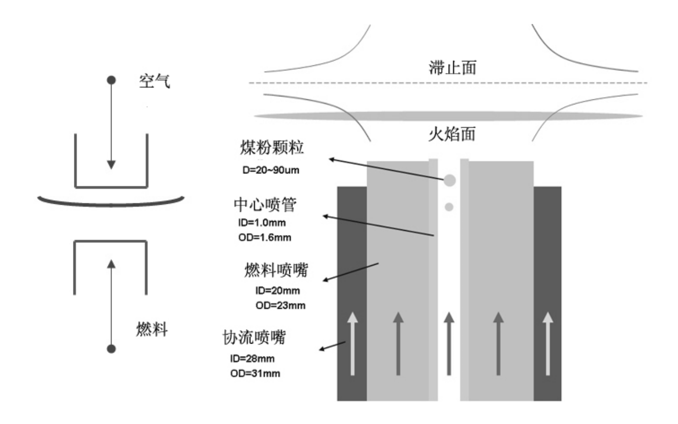


图 1 适用于煤粉燃烧的对冲火焰结构设计

Fig. 1 Schematic of the flame structure

稀疏煤粉颗粒从燃料喷嘴中心轴线处以一定初速度射入并穿越火焰面，从而观测煤粉在近似一维扩散火焰条件下的单颗粒反应特性。通过对中轴区图像的截取和统计，排除实验中非理想因素引入的不对称扰动。因此需在中轴区维持稳态的对冲扩散火焰面，并使颗粒以相同初速度进入。

为维持平面火焰结构，对应的煤粉载气流量较小（20~50 ml/min, 25 ℃, 101.325 kPa），且载气与颗粒流率需要独立控制。为此本文研制了全新的"碰撞-解聚"式给粉器，其原理是利用钢性针管在外力驱动下作高速强迫振动，与针管内的煤粉颗粒不断撞击使其发生解聚。煤粉颗粒的运动可分为附壁运动和脱离内壁面的碰撞运动。由于高频振动的针管摆幅大于针管内径，因此所有煤粉颗粒均会与针管内壁发生多次碰撞，最终在弹性碰撞及重力的合作用力下被高速甩出针管并弥散到气相中，见图 2。

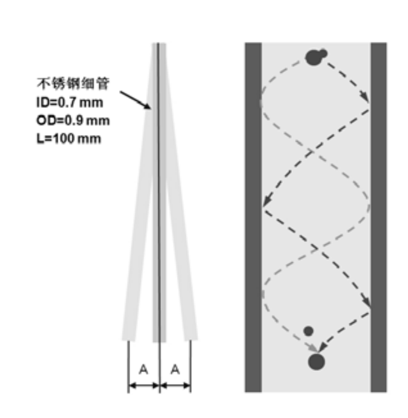


图 2 煤粉碰撞解聚原理示意图

Fig. 2 Schematic of collision theory

经过测试标定，"碰撞解聚式"给粉装置的性能满足设计要求，给粉量及稳定性测试结果见图 3。

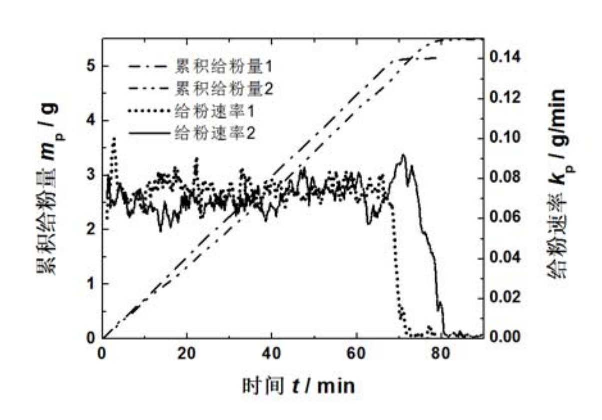


图 3 给粉特性（50V, 365 Hz, 褐煤 61~125 μm）

Fig. 3 Properties of Particle Seeder

图 4 给出了无煤粉颗粒条件下喷嘴区气相流场的 LDA 测速结果，显示距喷嘴轴线半径 3 mm 范围内，上喷嘴出口气流的轴向速度波动小于 6 %。良好的流场对称性和平坦均匀的中心区分布，提供了理想的实验条件。

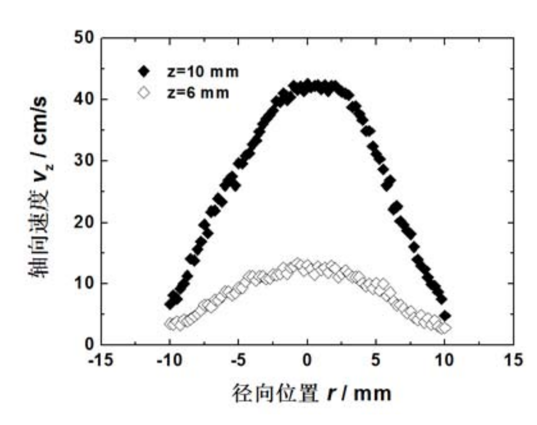


图 4 出口气流轴向速度的水平分布（z 为距下喷嘴高度）

Fig. 4 Velocity Profile of The Gas Flow

在对冲燃煤系统上的实验步骤为：（1）形成火焰：气体氧化剂与燃料射流对冲布置，点燃后形成具有稳定动量滞止面及层流扩散火焰面的流场结构；（2）表征火焰：通过测量和计算，获得火焰面中轴线上的气相温度和速度分布；（3）引入煤粉：煤粉颗粒从冷态的燃料端喷嘴一方沿中心对称轴以点源方式进入并穿越火焰面，期间受对流及辐射换热而升温并发生着火；（4）光学观测：采用 Lavision 公司 ICCD 拍摄和记录煤粉颗粒穿越火焰面的光学图像。ICCD 使用 50 mm 镜头增加近摄镜，调节光圈为最大值，快门取 70 μs，软件信号增益（Gain）设为 60，可得到瞬时火焰图像，其像素亮度值与火焰区光谱辐射强度线性对应，可反映出火焰区光谱辐射的瞬时强度信息。通过后期的图像数据甄别和处理，进而可表征煤粉的着火特性。

为便于观察煤粉的着火燃烧现象，选择挥发分含量较高的呼伦贝尔褐煤开展实验研究。对煤粉样品的预处理包括鼓风干燥、筛分粒径和密封保存三个步骤。煤质分析结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 实验用煤的工业分析

Table 1. Proximate Analysis of Pulverized Coal

煤种	A_d/%	V_d/%	FC_d/%	$Q_{net,d}$/MJ/kg
呼褐	12.1	38.83	49.07	25.60

表 2 实验用煤的元素分析（%）

Table 2. Ultimate Analysis of Pulverized Coal

煤种	C_d/%	H_d/%	O_d/%	N_d/%	S_d/%
呼褐	65.09	3.67	18.00	0.88	0.27

实验工况为：在体积分数 0.5-O_2 / 0.5-N_2 与 0.1~0.15-CH_4 / 0.9~0.85-N_2 形成的平面对冲扩散火焰条件下，引入 65-74 μm 的煤粉，流场拉伸率约为 200 s^{-1}。由于火焰中碳烟稀少，火焰厚度又小于 1 mm，难以用传统的接触或非接触测温法获得准确的火焰温度数值。为表征火焰条件，利用 CHEMKIN 4.1 计算气相工况，获得其火焰面最高温度为 1646 K。由于煤粉相较于气相火焰的发热量可忽略，因此计算的气相火焰温度可用于表征火焰条件。

2 结果与讨论

实验中典型 ICCD 单帧实验成像结果见图 5。

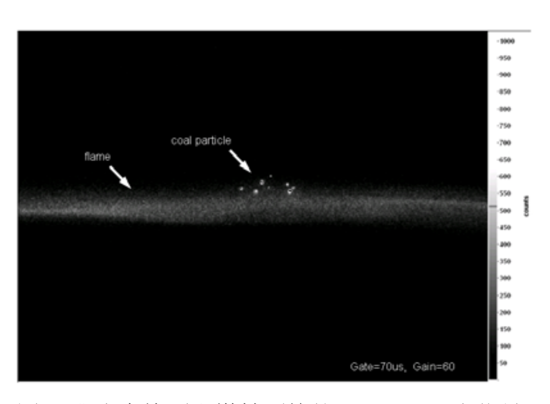


图 5 滞止火焰面和煤粉颗粒的 ICCD 可见光信号

Fig. 5 ICCD signal of the stagnation flame and coal particle

水平灰色区为火焰横截面的投影，实际火焰厚度约 1~2 mm。图中可明显区分出中心区域煤粉颗粒的球状火焰。实验中煤粉颗粒自下而上穿越火焰面后，再受逆向流场作用发生反弹并四散远离，因此火焰面中心对称轴区域拍摄的图像均为上行煤粉颗粒。在本文工况下，由于煤粉颗粒的入射离散性，火焰面上方的颗粒图像并不都聚集在中轴线处。数据分析过程中仅截取中心轴半径 1 mm 内，即流场分布平坦区的图像结果。观察发现，煤粉着火均发生在气相平面火焰的上方，即煤粉穿越火焰面过程的下游。而在相同火焰条件下，粒径较小的煤粉着火中心位置距离气相火焰面更近，这跟煤粉颗粒的特征加热时间尺度和弛豫时间尺度皆有重要关联。

在选择合适的火焰亮度阈值、颗粒亮度阈值、超阈值像素数量阈值前提下，对所有图像数据进行筛选，然后对火焰背景帧和有效颗粒帧分别进行二维像素亮度值统计平均，两者结果的点对点差值可排除火焰背景，得到煤粉颗粒沿程的辐射变化信息。对粒径 65-74 μm 的呼伦贝尔褐煤颗粒着火过程进行图像采集和处理。图 6 给出了气相燃料端 CH_4 体积分数分别为 0.1 和 0.15 时，煤颗粒归一化可见光信号强度随高度变化的趋势。

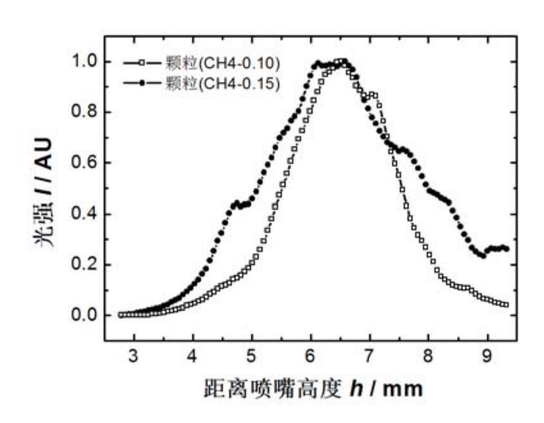


图 6 不同燃烧条件下煤颗粒着火过程可见光信号

（0.5-O_2/0.5-N_2，呼伦贝尔褐煤 65-74 μm，70 mg/min）

Fig. 6 ICCD signal of coal ignition in different conditions

CH_4 体积分数不同主要改变了火焰温度，因此两种火焰条件下煤颗粒的着火过程表现出明显区别。可见光信号曲线中的峰值代表发生了强烈的放热反应。因此 CH_4 体积分数 0.15 时火焰的温度较高，煤颗粒发生表面的异相着火，并导致发光强度增加，其曲线的左侧第一个峰代表了出现挥发分火焰。对于 CH_4 体积分数 0.1 时，煤颗粒表面的异相着火也同样使得发光强度增加，但随着表面氧化不断剧烈时信号连续增强，没出现任何峰值。

根据传统的着火理论[6]，粒径小于约 100 μm 时，高温下颗粒趋于发生均相-非均相联合着火，而较低温度下趋于发生非均相着火。结合图 6 结果，可发现高加热速率和高温下发生联合着火，析出挥发分在给定条件下具有更小的着火位置，有利于煤粉着火。至于煤粉颗粒光强信号与其着火位置的关

系，有待积累更多数据并确定合理判据。

由于实验尚难测得煤粉颗粒的温度和升温速率，故采用 ANSYS 13.0 流体动力学计算模块分析上述变化速率极高的瞬态过程。按实际尺寸和工况建立对冲扩散火焰轴对称二维网格模型，煤粉颗粒选用化学反应/扩散竞争模型。计算结果显示，煤粉颗在不到 20 ms 内即完成了穿越火焰面的过程，其温度变化如图 7 所示。

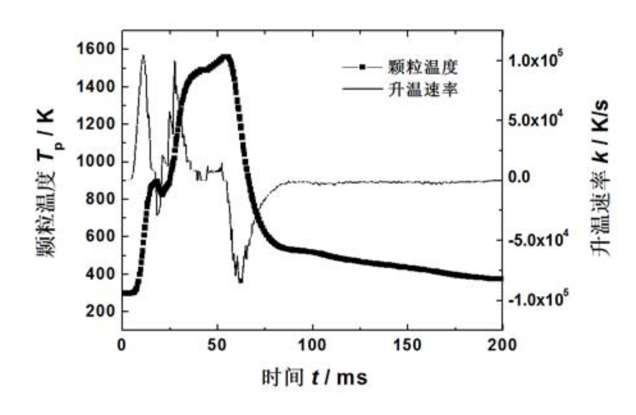


图 7 煤粉颗粒温度及加热速率随时间的变化

Fig. 7 History of particle temperature and heating rate

分析可知，接近气相火焰面时煤粉颗粒经历了一个升温速率急速增加的过程，颗粒的升温速率最高可到达 10^5 K/s，穿越气相火焰面后升温速率又迅速下降。颗粒温度在 900 K 附近有一个约 10 ms 的短暂保持期，直到挥发分着火并开始燃烧后，颗粒经历了第二次高速升温过程，使得颗粒温度最高接近 1600 K。随后挥发分燃尽并伴随着颗粒飞出反应区而不断降温。由于煤粉颗粒穿越火焰面作用时间短暂，并且发生在挥发分开始析出以前，因此推测这一过程的主要作用，可能在于对热解过程及挥发分析出的组成与产量方面有所影响。

对冲扩散火焰结构和煤粉引入方式决定了煤粉颗粒从燃料一侧穿越火焰面并进入氧化剂一侧。其中由火焰面附近高温气体引起的快速升温过程均处于还原性条件下，而穿过火焰面之后的着火和燃烧又几乎全部处于氧化性气氛中。从而煤粉颗粒会在经过火焰面后达到高温状态的同时骤然接触到氧化剂。这一特点会使得煤颗粒较之在普通高温氧化环境中的升温过程而言，具有更长的热解时间。因此可判断：如果煤粉粒径较大或穿越速度较快，火焰面对颗粒的加热升温不显著，对颗粒热解及着火的影响有限。反之，若颗粒粒径较小或穿越速度较慢使之在穿越火焰面进入氧化性氛围之前已经达到较高的温度，则会有两种情况：（1）当挥发分已开始明显析出，一旦颗粒进入高温氧化剂侧，即发生均相着火；（2）当挥发分析出较少尚未着火，而颗粒表面温度足够高，那么煤粉颗粒更趋向于首先发生非均相着火。对这两种情况，尚需通过进一步实验加以验证。

3 结束语

针对实际燃烧过程中煤粉颗粒穿越火焰面并影响其着火特性的现象，本文发展并建立了燃煤对冲火焰实验系统，解决了微小载气流量条件下煤粉引入和观测问题。通过对呼伦贝尔褐煤开展实验研究，发现煤粉着火均发生在气相平面火焰的下游。粒径越小的煤粉颗粒，由于加热时间尺度和热解时间尺度的相对关系发生变化，其着火位置距离气相火焰面越近。对冲扩散火焰结构和煤粉引入方式决定了煤粉颗粒从燃料一侧穿越火焰面并进入氧化剂一侧。这一特点会使得煤颗粒较之在普通高温氧化环境中的升温过程而言，具有更长的热解时间，并进一步影响着火机理、改变热解过程及挥发分析出的组成与产量。为了解释和研究清楚这一过程，利用对冲燃煤系统对其开展更多的探索性实验研究以获得重要的第一手数据，显然非常有意义。

参考文献

[1] Solomon P R, Fletcher T H and Pugmire R J. Progress in Coal Pyrolysis[J]. Fuel, 1993, 72(5): 587-597

[2] Serio M A, Hamblen D G, Markham J R, et al. Kinetics of Volatile Product Evolution in Coal Pyrolysis - Experiment and Theory[J]. Energy & Fuels, 1987, 1(2): 138-152

[3] Solomon P R and Fletcher T H. Impact of Coal Pyrolysis on Combustion[C]. 25th Symposium (International) on Combustion. 1994. Elsevier, 25(1): 463-474

[4] Williams A, Backreedy R, Habib R, et al. Modelling Coal Combustion: The Current Position[J]. Fuel, 2002, 81(5): 605-618

[5] Holtmeyer M L, Li G D, Kumfer B M, et al.The Impact of Biomass Cofiring on Volatile Flame Length[J]. Energy & Fuels, 2013,27(12):7762-7771

[6] 岑可法, 姚强, 骆仲泱等, 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 299-304

CEN Kefa, YAO Qiang, LUO Zhongyang, et al. Advanced Combustion[M]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2003: 299-304

附联系方式：

姓名：吴宁
地址：北京市清华大学蒙民伟科技大楼南楼
S-627 室，100084
手机：138-1042-4060
电话：010-62772972
E-mail：wun50@tsinghua.edu.cn